УДК 621.311.6

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СТРУКТУРНЫХ СХЕМ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ АВТОМАТИЧЕСКИХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Ю.А. Шиняков

Томский университет систем управления и радиоэлектроники
E-mail: Shua@main.tusur.ru

Рассмотрены структурные схемы систем электроснабжения автоматических космических аппаратов. Проведен их сравнительный энергетический анализ. Обоснована целесообразность использования на объектах с изменяющимися условиями эксплуатации и резко-переменными графиками нагрузки универсальной параллельно-последовательной структуры системы электроснабжения, обеспечивающей возможность экстремального регулирования мощности солнечной батареи и имеющей лучшие энергетические показатели.

Одной из важнейших бортовых систем автоматических космических аппаратов (КА) является система электроснабжения (СЭС), которая представляет собой совокупность первичных и вторичных источников тока, аппаратуры преобразования энергии и стабилизации выходного напряжения с необходимой автоматикой контроля и управления. В качестве первичных источников энергии наибольшее применение находят солнечные батареи (СБ), а в качестве накопителей энергии для питания бортовых потребителей энергии на теневых участках орбиты и при пиковых нагрузках обычно используются аккумуляторные батареи (АБ).

Аппаратура регулирования и контроля (АРК), включающая в свой состав как требуемый набор энергопреобразующих устройств, так и необходимые устройства контроля параметров СЭС, согласовывает работу СБ, АБ и нагрузки. При изменении освещенности СБ и деградации характеристик СБ и АБ она обеспечивает заданное качество выходного напряжения в установившихся и переходных режимах, реализацию оптимальных алгоритмов управления режимами заряда-разряда АБ и оптимальное использование СБ.

Основные базовые структурные схемы СЭС, нашедшие широкое применение при разработке и создании автоматических КА, представлены на рис. 1 и 2 [1].

На начальном этапе развития космической техники наибольшее распространение получила надежная структура СЭС с общими силовыми шинами первичного источника питания, накопителя энергии и нагрузки (рис. 1, *а*). В такой системе напряжение на СБ и на выходной шине питания нагрузки (Н) определяется напряжением АБ, что приводит к невозможности оптимизации режима работы СБ при изменении условий ее эксплуатации и значительной нестабильности выходного напряжения СЭС. Ограничение диапазона изменения напряжения АБ с целью повышения стабильности напряжения питания бортовых потребителей ухудшает энергетические характеристики АБ, увеличивает частоту циклирования и уменьшает ее ресурс.

Усложнение и увеличение числа задач, решаемых автоматическими КА непосредственно в космосе, потребовали применения новых подходов к проектированию бортовых систем и предопределили переход к использованию централизованных СЭС с раздельными силовыми шинами СБ-АБ-Н (рис. 1, *б*, *в*, рис. 2), позволяющих согласовывать режимы источников энергии с нагрузкой и тем самым существенно повысить энергетическую эффективность, понизить массу СЭС и увеличить ресурс КА [2]. В СЭС дополнительно введены зарядные устройства (ЗУ), разрядные устройства (РУ) и регуляторы напряжений (РН), принципы постро-

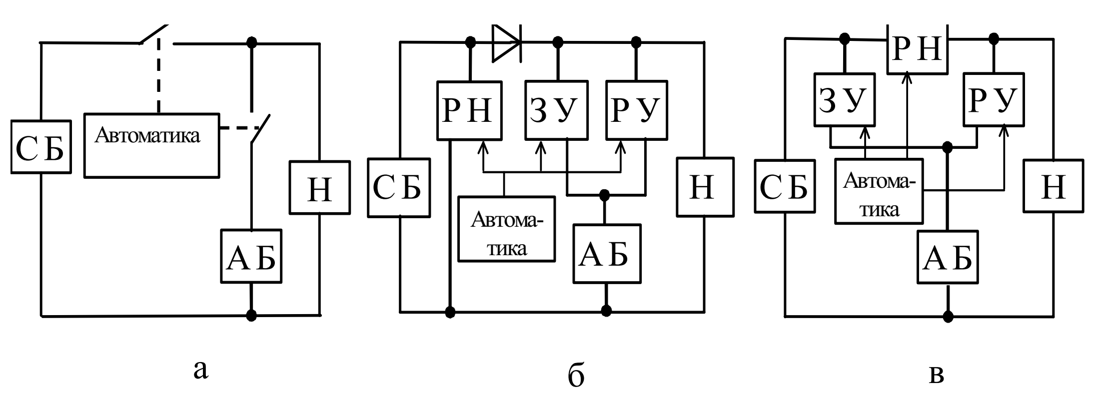


Рис. 1. *Структурные схемы СЭС: а) с общими силовыми шинами, б) параллельная, в) параллельно-последовательная*

ения которых в СЭС, выполненных по всем названным структурам, имеют много общего.

Недостатком СЭС параллельной структуры (ПаС) является «жесткая» связь в одном направлении (через диод) шин СБ и нагрузки (Н), что резко снижает управляемость системы, так как не позволяет регулировать напряжение СБ в оптимальной рабочей точке при изменении условий эксплуатации (температура, освещенность и т. д.).

В СЭС параллельно-последовательной структуры (ППС) шины источников энергии и нагрузки разделены между собой преобразующими устройствами (ЗУ, РУ, РН). Это дает возможность перераспределения потоков энергии в СЭС по любому алгоритму и закону. Система электроснабжения становится управляемой полностью. Потери на последовательном ключе регулятора напряжения РН компенсируются возможностью коммутации отдельных секций СБ непосредственно к шине питания нагрузки и применением экстремального регулирования мощности СБ [3, 4].

В СЭС выполненной по последовательной структуре (ПС) (рис. 2, *а*) передача энергии от СБ в нагрузку всегда осуществляется через два преобразующих устройства (ЗУ и РУ), поэтому ее использование ограничено и возможно только на КА с резкопеременными графиками нагрузки и значительными теневыми участками, то есть, только на объектах, на которых большая часть энергии должна сначала запасаться в АБ, а затем передаваться в нагрузку.

На рис. 2, *б*, представлена схема СЭС с подключением ЗУ и РУ к входной шине СБ, которую можно классифицировать как производную параллельно-последовательной структуры (рис. 1, *в*). Отличие заключается в том, что выход РУ подключен к шине СБ. Такое переключение выхода РУ с шины питания нагрузки на шину СБ ведет к увеличению потерь энергии в СЭС, т. к. передача энергии от АБ в нагрузку осуществляется через два последовательно соединенных устройства – РУ и РН. Однако при этом обеспечиваются более качественные параметры электропитания, поскольку только один регулятор РН стабилизирует выходное напряжение. Стабилизатор напряжения СН обеспечивает электропитание дополнительной нагрузки Н2 малой мощности с другим уровнем напряжения. Количество дополнительных стабилизаторов напряжения СН и шин питания бортовых потребителей с уровнем напряжения, отличающимся от значения основной стабилизированной шины питания нагрузки Н1, может быть произвольным.

Представленные упрощенные структурные схемы являются базовыми, которые значительно уточняются при разработке структурно-функциональных схем АРК и проведении энергетического расчета СЭС. При этом уточняется требуемое количество АБ и секций СБ, конфигурация АРК, учитывается целый ряд специфических требований конкретного КА, обусловленных его функциональным назначением, конструктивным исполнением, условиями терморегулирования и т. д.

Одним из важнейших показателей любой автономной энергетической системы является ее энергетическая эффективность, поэтому представляет практический интерес проведение сопоставительного анализа энергетической эффективности базовых структур СЭС автоматических КА, с целью определения областей их рационального применения.

Энергетическая эффективность СЭС ($K_э$) аналитически выражается отношением разности между энергией, выработанной первичным источником ($W_{СБ}$) при принятом в системе законе регулирования мощности СБ, и потерями энергии в преобразующих устройствах АРК ($\Delta W_п$) и АБ ($\Delta W_{АБ}$) к энергии, которую может выработать СБ при непрерывном регулировании в точке максимальной мощности ($W_{СБмакс}$)

$$K_э = (W_{СБ} - \Delta W_п - \Delta W_{АБ}) / W_{СБ\,макс} = W_н / W_{СБ\,макс} = \\ = \int^{T} P_н dt / \int^{T} P_{СБ\,макс} dt, \quad (1)$$

где $W_н$ – энергия, доставляемая в нагрузку; $P_{СБмакс}$ – экстремальное текущее значение мощности СБ; $P_н$ – текущее значение мощности нагрузки; T – период функционирования СЭС [1].

Выражение (1) можно преобразовать к виду

$$K_э = W_{СБ} / W_{СБ\,макс} - (\Delta W_п + \Delta W_{АБ}) / W_{СБ\,макс} = \\ = K_{т\,СБ} - K_{п\,СЭС}. \quad (2)$$

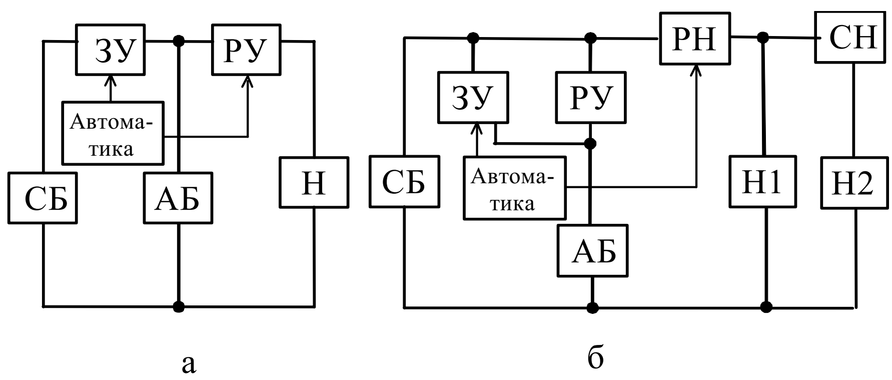


Рис. 2. *Структурные схемы СЭС: а) с последовательным соединением ЗУ и РУ, б) с подключением ЗУ и РУ к шине СБ*

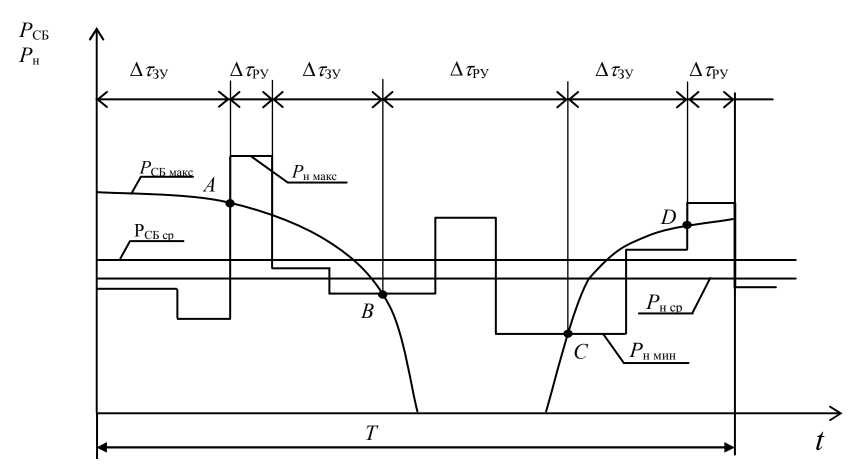


Рис. 3. *Циклограмма нагрузки и график мощности СБ*

Коэффициент $K_{тСБ}$ характеризует эффективность использования первичного источника (точность поддержания экстремума мощности СБ), а $K_{пСЭС}$ – уровень потерь энергии в СЭС. В системе с экстремальным регулированием мощности СБ $K_{т\,СБ}\to 1$ ($K_{э}\to 1-K_{п\,СЭС}$).

Из (2) следует, что повышение энергетической эффективности СЭС может достигаться двумя путями – максимально возможным отбором энергии от СБ и снижением потерь энергии в АБ, регулирующих и коммутирующих устройствах АРК.

Эффективность преобразования энергии может быть повышена увеличением КПД регулирующей аппаратуры и улучшением эксплуатационных энергетических характеристик АБ.

Наиболее действенным способом повышения эффективности преобразования энергии в СЭС является определение и выбор оптимальной структуры, обеспечивающей при детерминированных циклограммах ориентации объекта и мощности нагрузки максимально возможное использование по мощности СБ и минимальные потери энергии в АБ, силовых преобразующих и коммутирующих устройствах АРК.

Из анализа произвольной циклограммы нагрузки и графика мощности СБ (рис. 3) аналитические уравнения энергобаланса для базовых структур (параллельной, параллельно-последовательной с ЭРМ СБ и последовательной с ЭРМ СБ) имеют вид:

$$W_{СБ}^{ПаС}=\int_0^{T}P_{СБ}dt=\int_0^{T}P_{н}dt/\eta_{РН}+ \\ +((1-\eta_{ЗУ}\eta_{РУ}\eta_{АБ})/\eta_{РН}\eta_{ЗУ}\eta_{РУ}\eta_{АБ})\times \\ \times\sum_{i=1}^{n}\int_0^{\Delta\tau_{РУ_i}}(P_{н}-P_{СБ}\eta_{РН})dt, \quad (3)$$

$$W_{СБ\,ЭРМ}^{ППС}=\int_0^{T}P_{СБ\,макс}dt=\int_0^{T}P_{н}dt/\eta_{РН}+ \\ +((\eta_{РН}-\eta_{ЗУ}\eta_{РУ}\eta_{АБ})/\eta_{РН}\eta_{ЗУ}\eta_{РУ}\eta_{АБ})\times \\ \times\sum_{i=1}^{n}\int_0^{\Delta\tau_{РУ_i}}(P_{н}-P_{СБ\,макс}\eta_{РН})dt, \quad (4)$$

$$W_{СБ\,ЭРМ}^{ПС}=\int_0^{T}P_{СБ\,макс}dt=\int_0^{T}P_{н}dt/\eta_{ЗУ}\eta_{РУ}+ \\ +((1-\eta_{АБ})/\eta_{ЗУ}\eta_{РУ}\eta_{АБ})\times \\ \times\sum_{i=1}^{n}\int_0^{\Delta\tau_{РУ_i}}(P_{н}-P_{СБ\,макс}\eta_{РН})dt, \quad (5)$$

где $P_{СБ}$ – текущее значение мощности; $\eta_{РН}\eta_{ЗУ}\eta_{РУ}\eta_{АБ}$ – КПД силовых устройств АРК и коэффициент отдачи АБ; $\Delta\tau_{РУ_i}$ – время работы РУ при пиковых нагрузках и в периоды затенения СБ.

Из (1), (4) и (5) получаем выражения коэффициентов энергетической эффективности СЭС с последовательным РН и ЭРМ СБ, а также последовательной структуры СЭС с ЭРМ СБ

$$K_{э\,ЭРМ}^{ППС}=\eta_{РН}/(1+((\eta_{РН}-\eta_{ЗУ}\eta_{РУ}\eta_{АБ})/\eta_{ЗУ}\eta_{АБ}\eta_{РУ})\times \\ \times\sum_{i=1}^{n}\int_0^{\Delta\tau_{РУ_i}}(P_{н}-P_{СБ\,макс}\eta_{РН})dt/\int_0^{T}P_{н}dt), \quad (6)$$

$$K_{э\,ЭРМ}^{ПС}=\eta_{ЗУ}\eta_{РУ}/(1+((1-\eta_{АБ})/\eta_{АБ})\times \\ \times\sum_{i=1}^{n}\int_0^{\Delta\tau_{РУ_i}}(P_{н}-P_{СБ\,макс}\eta_{РН})dt/\int_0^{T}P_{н}dt). \quad (7)$$

Учитывая, что эффективность использования режима экстремального регулирования равна

$$K_{т\,СБ}=W_{СБ}/W_{СБ\,макс}=\int_0^{T}P_{СБ}dt/\int_0^{T}P_{СБ\,макс}dt,$$

коэффициент энергетической эффективности СЭС с параллельным РН с учетом (1) и (3) имеет вид:

$$K_{э}^{ПаС}=K_{Т\,СБ}\eta_{РН}/(1+((1-\eta_{ЗУ}\eta_{РУ}\eta_{АБ})/\eta_{ЗУ}\eta_{АБ}\eta_{РУ})\times \\ \times\sum_{i=1}^{n}\int_0^{\Delta\tau_{РУ_i}}(P_{н}-P_{СБ}\eta_{РН})dt/\int_0^{T}P_{н}dt). \quad (8)$$

Аналитические уравнения энергобаланса последовательной и параллельно-последовательной структуры без режимов ЭРМ СБ ($W_{СБ}^{ПС}, W_{СБ}^{ППС}$) имеют вид, аналогичный выражениям (5) и (4) при условии замены $P_{СБ\,макс}$ на $P_{СБ}$, а уравнения коэффициентов энергетической эффективности ($K_{э}^{ПС}, K_{э}^{ППС}$) кро-

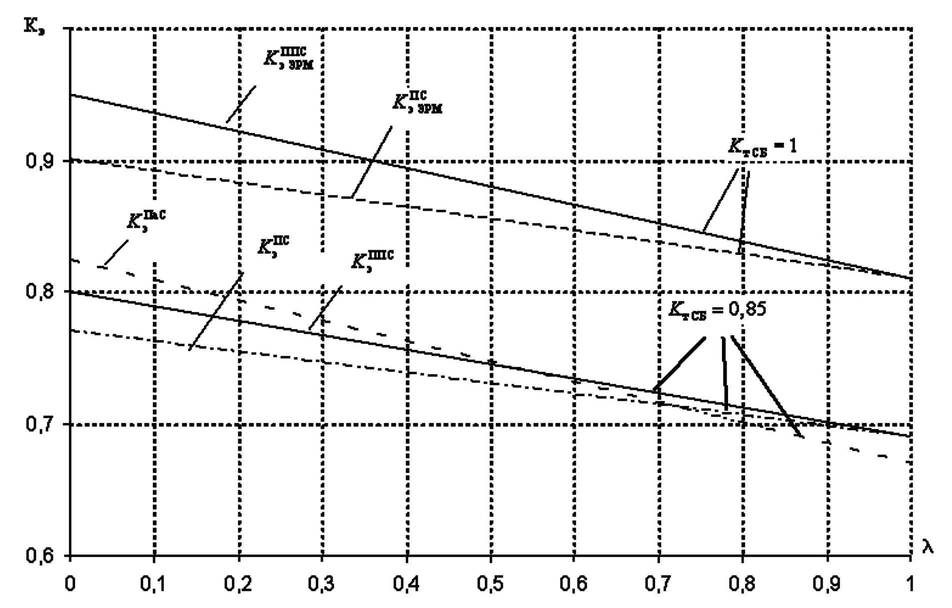


Рис. 4. *Зависимости коэффициентов энергетической эффективности от и $K_{т\,СБ}$*

ме этого должны быть умножены на коэффициент эффективности использования СБ ($K_{т\,СБ}$).

Из анализа выражений (6–8) следует, что энергетическая эффективность СЭС зависит от значений КПД устройств РН, ЗУ, РУ ($\eta_{РН}$, $\eta_{ЗУ}$, $\eta_{РУ}$), значения коэффициента отдачи АБ по энергии ($\eta_{АБ}$), точности регулирования экстремума мощности СБ ($K_{т\,СБ}$) и степени совпадения графиков мощности СБ и нагрузки, которая характеризуется долей энергии (λ), передаваемой в нагрузку по цепи ЗУ-АБ-РУ:

$$\lambda = \sum_{i=1}^{n} \int_{0}^{\Delta\tau_{РУ_i}} (P_{н} - P_{СБ}\,\eta_{РН})dt \Big/ \int_{0}^{T} P_{н}dt.$$

На рис. 4 представлены графики зависимости коэффициентов энергетической эффективности всех трех базовых структур (ППС, ПаС, ПС) в зависимости от значений λ и точности регулирования экстремума мощности СБ ($K_{тСБ}$). Графики составлены при условии, что $K_{тСБ}$ систем без ЭРМ СБ равен 0,85 (значение задано произвольно), коэффициенты полезного действия ЗУ, РУ, а также коэффициенты отдачи АБ по энергии всех систем имеют одинаковые значения ($\eta_{ЗУ}$=0,95, $\eta_{РУ}$=0,95, $\eta_{АБ}$=0,9), а коэффициенты полезного действия устройств РН различаются ($\eta_{РН\,ППС}$=0,95, $\eta_{РН\,ПаС}$=0,97). При условии увеличения или уменьшения $K_{тСБ}$ зависимости коэффициентов энергетической эффективности всех базовых структур без реализации режима ЭРМ СБ ($K_{э}^{ПС}, K_{э}^{ППС}, K_{э}^{ПаС}$) пропорционально повышаются или понижаются.

Из анализа графиков следует, что применение структуры СЭС с параллельным РН целесообразно только при передаче малой доли энергии в нагрузку через АБ (λ<0,4) и высоком значении коэффициента эффективности использования СБ ($K_{тСБ}\to 1$). Значительные преимущества имеют структуры обеспечивающие возможность реализации режима ЭРМ СБ, т. к. сложно предположить, что в системе с параллельным РН, без активного поиска экстремума мощности СБ, возможно достижение эффективности использования первичного источника более 0,90...0,95.

Целесообразность использования параллельного или последовательного РН определяется спецификой назначения объекта, его условиями эксплуатации, а также соотношением параметров циклограмм энергопотребления и графика изменения мощности СБ. На объектах с изменяющимися условиями эксплуатации и резко-переменными графиками нагрузки (λ>0,4) предпочтительнее использование универсальной параллельно-последовательной структуры автономной СЭС, обеспечивающей возможность экстремального регулирования мощности СБ и имеющей лучшие энергетические показатели.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Системы электропитания космических аппаратов / Б.П. Соустин, В.И. Иванчура, А.И. Чернышев, Ш.Н. Исляев. – Новосибирск: Наука, 1994. – 318 с.
2. Шиняков Ю.А. Эффективность использования солнечных батарей в автономных системах электроснабжения // Проблемы комплексного проектирования и испытаний энергетических устройств космических аппаратов. – Куйбышев, 1986. – Вып. 3.4.1. – С. 58–59.
3. Чернышев А.И., Шиняков Ю.А., Гордеев К.Г. Экстремальный регулятор мощности для автономных систем электроснабжения // VIII Всес. конф. по космической технике: Материалы. – Куйбышев, 1983. – С. 45–52.
4. Пат. 2101831 РФ. МКИ[6] H02J 7/35. Система электропитания с экстремальным регулированием мощности фотоэлектрической батареи / К.Г. Гордеев, С.П. Черданцев, Ю.А. Шиняков. Изобретения. – 1998. – № 1.